DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/24

Avaliação Experimental de Vibrações em Barragens de Rejeito: Subsídios para Controle Geotécnico e Construtivo de Obras de Reforço

Letícia Capanema Ribeiro
Engenheira Civil, VALE, Belo Horizonte, Brasil, leticia.ribeiro@vale.com

Sheyla Carla Rodrigues
Engenheira Civil, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, sheyla.rodrigues@bvp.eng.br

Rayala Lisboa Masensini
Engenheira Civil, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, rayala.lisboa@bvp.eng.br

Wesley Durval Soares de Carvalho
Engenheiro Civil, Msc.,VALE, Belo Horizonte, Brasil, wesley.soares.carvalho@vale.com

Paulo César da Silva Júnior
Engenheiro Civil, Msc.,PROGEN, Belo Horizonte, Brasil, C0691354@vale.com

RESUMO: A realização de testes de vibração antes de intervenções em barragens de rejeito alteadas a montante é uma medida preventiva essencial para garantir a estabilidade geotécnica e a segurança operacional durante todas as etapas construtivas. Vibrações geradas por equipamentos podem elevar a poropressão nos rejeitos, comprometendo a estabilidade do maciço e aumentando o risco de liquefação ou deformações não previstas em projeto. Este estudo analisa os efeitos dessas vibrações durante a construção de um reforço em enrocamento, com foco na velocidade de partícula e em curvas de atenuação associadas a diferentes distâncias, que permitem estabelecer parâmetros técnicos de controle. O objetivo é definir níveis de vibração admissíveis e regras operacionais que evitem a geração de poropressões significativas. A metodologia incluiu testes em pista experimental, simulando condições reais de obra, utilizando equipamentos convencionais de terraplenagem, como caminhões basculantes, escavadeiras e tratores de esteiras. O monitoramento foi realizado por meio de 30 instrumentos distintos. Os resultados esperados envolvem a definição de limites de vibração, distanciamentos mínimos entre equipamentos e frentes de trabalho, e a delimitação de zonas de influência. Esses parâmetros apoiarão o planejamento e a logística de tráfego de máquinas, compatibilizando segurança e produtividade, além de subsidiar decisões técnicas e planejamento.

PALAVRAS-CHAVE: Vibração, barragem de rejeito, monitoramento, estabilidade geotécnica.

ABSTRACT: The execution of vibration tests prior to interventions on upstream-raised tailings dams is an essential preventive measure to ensure geotechnical stability and operational safety throughout all construction stages. Vibrations generated by equipment can increase pore pressure within the tailings, compromising the stability of the structure and raising the risk of liquefaction or deformations not anticipated in the design.
This study analyzes the effects of these vibrations during the construction of a rockfill reinforcement, focusing on particle velocity and on attenuation curves associated with different distances, which allow the establishment of technical control parameters. The objective is to define admissible vibration levels and operational rules that prevent the generation of significant pore pressures.
The methodology included tests on an experimental track, simulating real construction conditions and using conventional earthmoving equipment such as dump trucks, excavators, and bulldozers. Monitoring was carried out using 30 different instruments. The expected results involve defining vibration limits, minimum distances between equipment and work fronts, and delineating influence zones. These parameters will support planning and logistics for machinery traffic, ensuring both safety and productivity, in addition to supporting technical decisions and project planning.

KEYWORDS: Vibration, tailings dam, Monitoring, Geotechnical stability.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de rejeito alteadas a montante apresentam elevada vulnerabilidade geotécnica devido à presença de materiais finos, saturados e de baixa resistência, que exibem comportamento frágil e forte suscetibilidade a variações de poropressão. Essas características aumentam o risco de liquefação e instabilidade, tornando as intervenções próximas ao maciço especialmente sensíveis às vibrações geradas por equipamentos pesados. A operação de máquinas pode induzir tensões dinâmicas capazes de elevar temporariamente a poropressão em rejeitos saturados, potencialmente comprometendo a estabilidade global da barragem, causando deformações indesejadas e, em cenários críticos, favorecendo a liquefação.
Nesse contexto, testes de vibração prévios à execução de obras de reforço são essenciais para avaliar a resposta dinâmica do maciço e estabelecer limites operacionais seguros. A análise de parâmetros como velocidade de partícula, curvas de atenuação e zonas de influência permite definir condições de operação compatíveis com a segurança geotécnica. O presente estudo avalia os efeitos das vibrações induzidas por equipamentos típicos de terraplenagem por meio de testes controlados em pista experimental, integrando o monitoramento de vibração e poropressão. Os resultados visam definir limites admissíveis de vibração e distanciamentos seguros, fornecendo subsídios para o controle geotécnico, o planejamento construtivo e seguro da obra.

2 OBJETIVO

O objetivo do teste foi avaliar os efeitos das vibrações induzidas pela operação de equipamentos típicos de obras de reforço em uma barragem de rejeito alteada a montante, por meio de testes controlados em pista experimental, a fim de subsidiar critérios técnicos seguros para a execução das atividades construtivas. Os objetivos específicos incluíram quantificar os níveis de vibração gerados por equipamentos de terraplenagem, tanto operando isoladamente quanto em combinação; avaliar a propagação das vibrações no maciço por meio da determinação da velocidade de partícula (PPV) e da elaboração de curvas de atenuação; comparar os níveis registrados com os limites de atenção e alerta definidos na carta de risco; verificar a resposta de poropressão em fundações de baixa resistência submetidas a carregamentos dinâmicos; estabelecer limites máximos admissíveis de vibração compatíveis com a segurança geotécnica; definir distanciamentos seguros entre equipamentos e frentes de trabalho para diferentes cenários operacionais; e fornecer subsídios para o controle de vibrações, o monitoramento geotécnico e o planejamento da construtibilidade durante a execução da obra.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área estudada corresponde a uma barragem de rejeito alteada a montante, onde está em planejamento a execução de obras em enrocamento que envolvem o tráfego de equipamentos de terraplenagem próximos ao maciço. Devido aos riscos associados às vibrações geradas por essas atividades, foi implantada uma pista experimental para avaliar o comportamento dinâmico da fundação e a resposta vibratória do maciço.
A pista foi instalada em uma região onde os equipamentos atuam diretamente sobre materiais de fundação de baixa resistência, condição crítica para avaliar a transmissão de cargas dinâmicas. Essa configuração permitiu investigar a propagação de vibrações e seus efeitos tanto nos materiais subjacentes quanto no maciço adjacente. O local apresenta rejeitos granulares nas camadas superficiais e materiais de fundação pouco competentes, o que reforça a importância de estudar possíveis impactos nas poropressões e na estabilidade, mesmo sem carregamento direto sobre o maciço. A área conta com instrumentação geotécnica permanente, complementada por instrumentos temporários instalados especificamente para os testes, permitindo uma avaliação integrada das vibrações, poropressões e propagação das ondas geradas pelos equipamentos.

4 METODOGOLOGIA

A metodologia consistiu na avaliação das vibrações geradas por equipamentos previstos para as obras de reforço, priorizando um cenário geotécnico crítico: a atuação direta sobre materiais de fundação de baixa resistência. Para isso, implantou-se uma pista experimental a jusante do maciço, permitindo o tráfego

controlado de máquinas diretamente sobre a fundação, condição representativa para analisar a transmissão de carregamentos dinâmicos.
O arranjo experimental possibilitou avaliar tanto a resposta vibratória da fundação quanto a propagação das vibrações em direção ao maciço de rejeito, por meio de instrumentação posicionada a montante. Assim, foi possível analisar efeitos vibratórios e hidromecânicos sem tráfego direto sobre o maciço.
Foram utilizados equipamentos típicos de terraplenagem, caminhões basculantes (carregados e vazios), escavadeiras, tratores de esteira, carregadeiras e motoniveladoras, operando com velocidades controladas para reproduzir condições reais de obra. Os testes incluíram operações isoladas, combinações simultâneas e múltiplas passagens para avaliar repetitividade e superposição de vibrações.
O monitoramento geotécnico integrou 30 instrumentos permanentes e provisórios, incluindo piezômetros automatizados, piezômetros de corda vibrante, sismógrafos triaxiais e sensores de microssísmica. Todos foram sincronizados para correlacionar vibração e poropressão. As leituras foram contínuas antes, durante e após as passagens.
O acompanhamento técnico em campo garantiu controle operacional, qualidade dos registros e validação dos procedimentos, assegurando representatividade dos resultados para subsidiar o projeto e as etapas construtivas.

5 ANÁLISE DOS DADOS

5.1 Análise das Vibrações na Fundação

A análise das vibrações na fundação foi conduzida com base na avaliação da resposta dinâmica do terraço coluvionar, considerado um material de menor resistência mecânica e, portanto, mais sensível à transmissão de carregamentos dinâmicos. Os registros de velocidade de partícula obtidos nessa condição permitiram avaliar a propagação das vibrações induzidas pelos equipamentos diretamente para a fundação. As figuras a seguir apresentam os resultados das leituras dos geofones para diferentes distâncias.

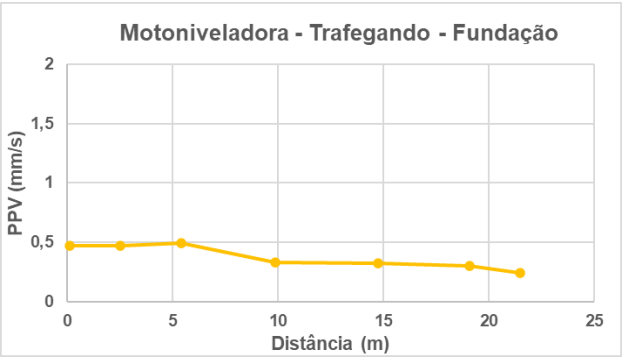


Figura 1. Curva de Atenuação – Motoniveladora – Trafegando

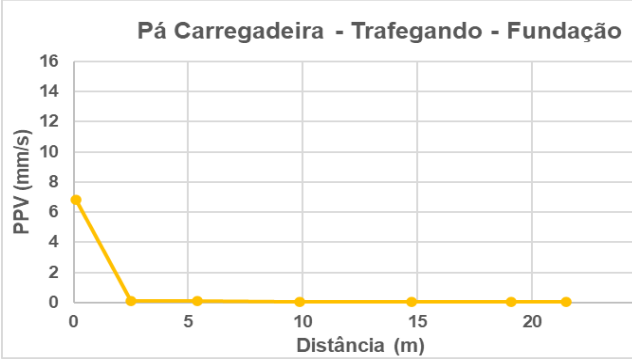


Figura 2. Curva de Atenuação – Pá Carregadeira – Trafegando

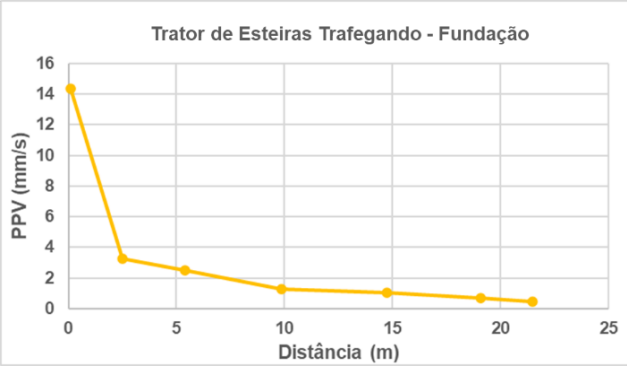


Figura 3. Curva de Atenuação – Trator de Esteiras – Trafegando

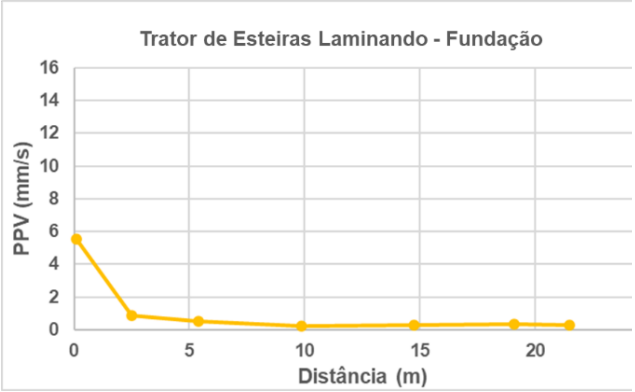


Figura 4. Curva de Atenuação – Trator de Esteiras – Laminando

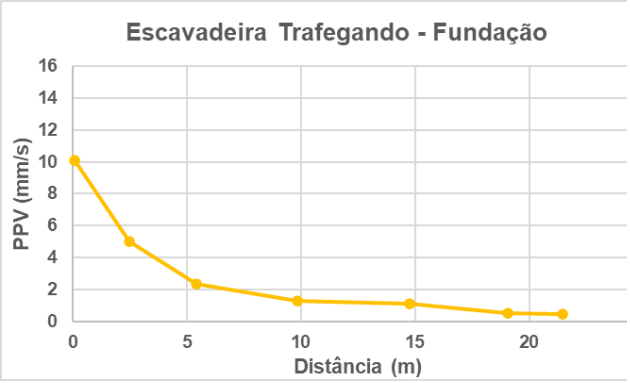


Figura 5. Curva de Atenuação – Escavadeira – Trafegando

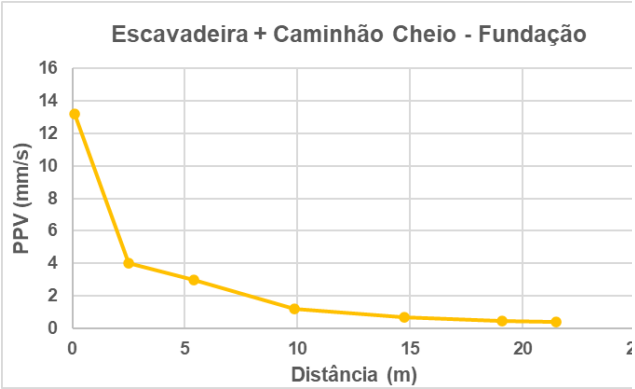


Figura 6. Curva de Atenuação – Escavadeira + Caminhão Cheio – Trafegando

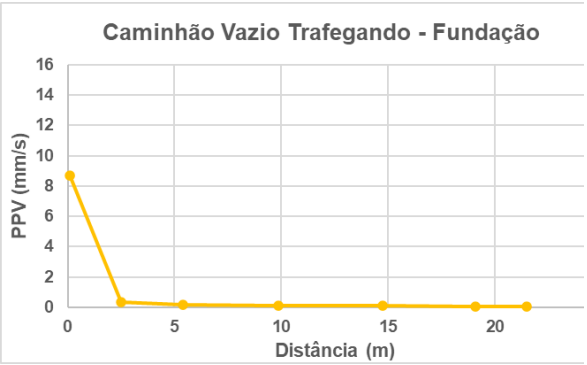


Figura 7. Curva de Atenuação – Caminhão – Trafegando

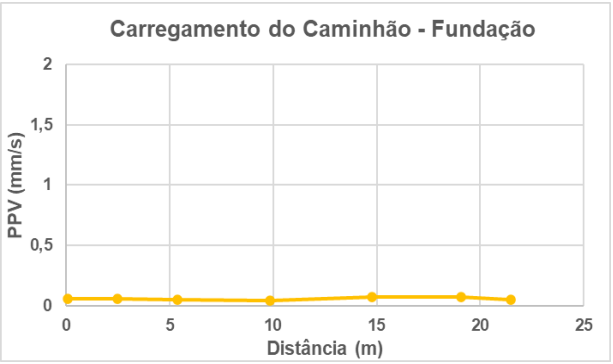


Figura 8. Curva de Atenuação – Carregamento do Caminhão

Com base na análise das curvas apresentadas, foram destacadas aquelas com maiores amplitudes, representativas dos equipamentos críticos que requerem maior atenção durante a operação conjunta. Observa-se, conforme a figura abaixo, que a aproximadamente 10 m de distância o PPV é da ordem de 1,6 mm/s, indicando atenuação significativa em relação ao valor registrado no geofone central à pista, da ordem de 14 mm/s. As curvas de atenuação evidenciam a redução progressiva da intensidade das vibrações com o aumento da distância à fonte, mesmo em condição crítica de atuação direta sobre os materiais de fundação. Assim, para situações de operação simultânea de escavadeira, caminhão carregado e trator de esteiras, recomenda-se que o limite operacional seja de 20 m visto que a essa distância há uma atenuação significativa.

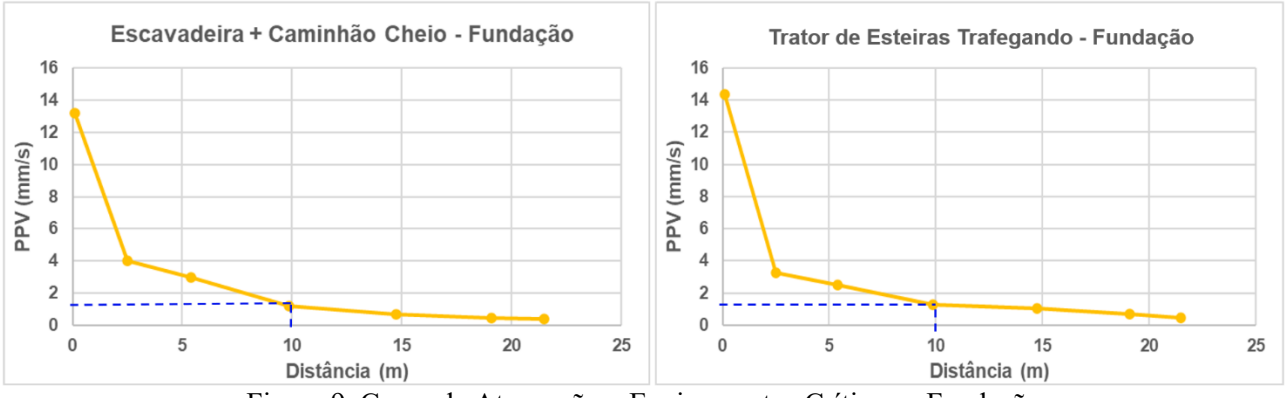


Figura 9. Curva de Atenuação – Equipamentos Críticos – Fundação

A análise integrada entre os registros de vibração e os dados de poropressão indicou que as variações observadas permaneceram dentro da faixa de comportamento natural do sistema, sem correlação direta com os eventos vibratórios induzidos. Dessa forma, os resultados apresentados pelas figuras a seguir, indicam que os níveis de vibração gerados durante o teste não foram suficientes para provocar incrementos significativos de poropressão na fundação (>2kPa).

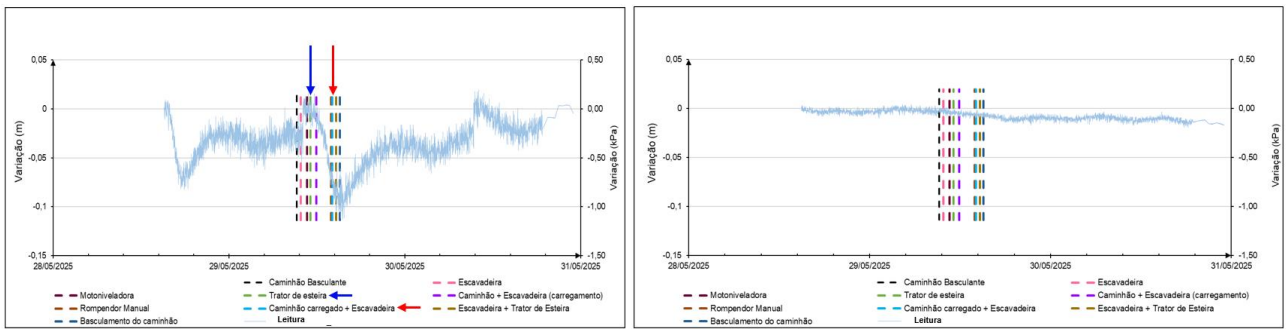


Figura 10. Piezômetro Existente e Permanente Próximos à Pista (1) Teste e distante a pista teste (2)

5.2 Avaliação das Vibrações no Rejeito

A avaliação das vibrações no maciço de rejeito foi realizada com base nos registros obtidos pelos geofones instalados a montante da pista de testes, sendo analisada a resposta vibratória do rejeito em função da propagação das ondas geradas pela operação dos equipamentos sobre a fundação. Dessa forma, os resultados apresentados referem-se exclusivamente à resposta do maciço às vibrações propagadas, não havendo solicitação dinâmica direta por tráfego de equipamentos nessa região. As figuras a seguir apresentam as curvas de atenuação da velocidade de partícula (PPV) obtidas para o rejeito, considerando a operação de equipamentos isolados e de combinações representativas das condições de obra.

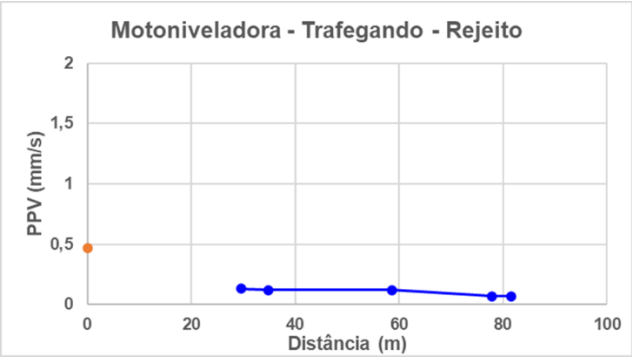


Figura 11. Curva de Atenuação – Motoniveladora – Trafegando

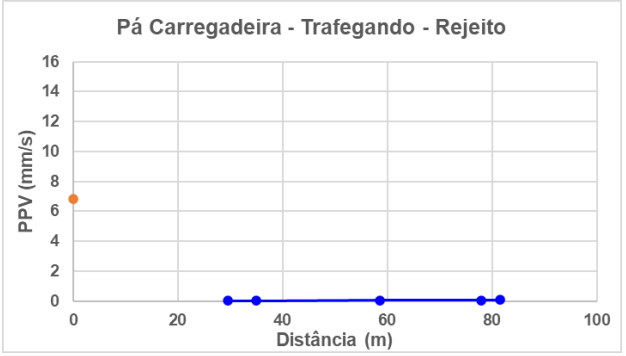


Figura **12**. Curva de Atenuação – Pá Carregadeira – Trafegando

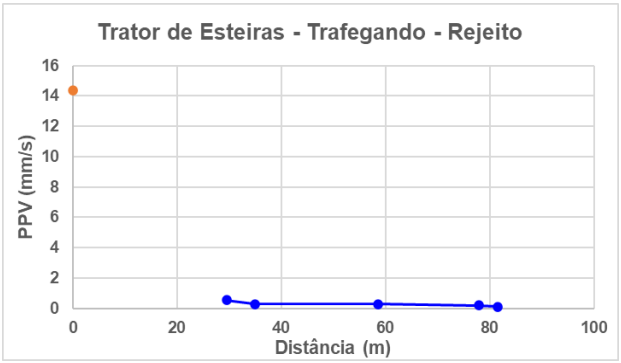


Figura 13. Curva de Atenuação – Trator de Esteiras – Trafegando

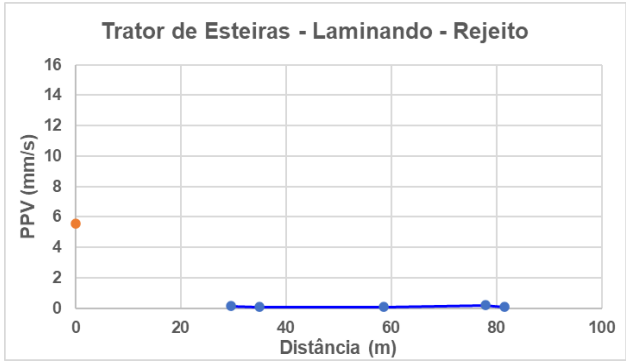


Figura 14. Curva de Atenuação – Trator de Esteiras – Laminando

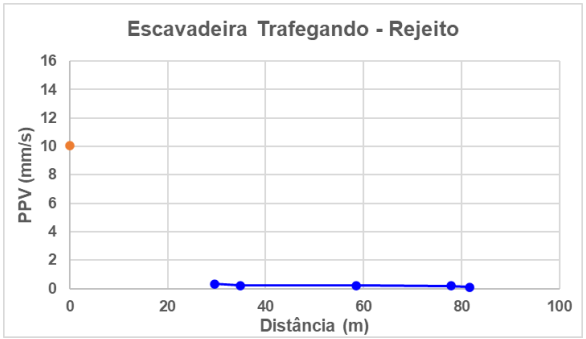


Figura 15. Curva de Atenuação – Escavadeira – Trafegando

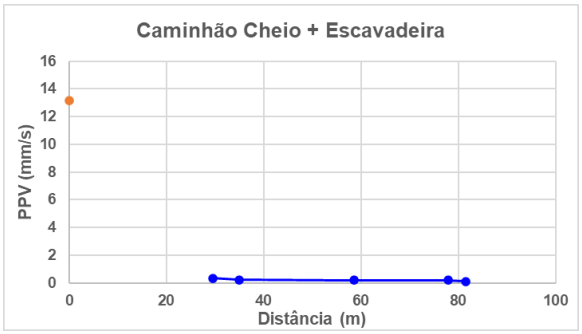


Figura 16. Curva de Atenuação – Escavadeira + Caminhão Cheio – Trafegando

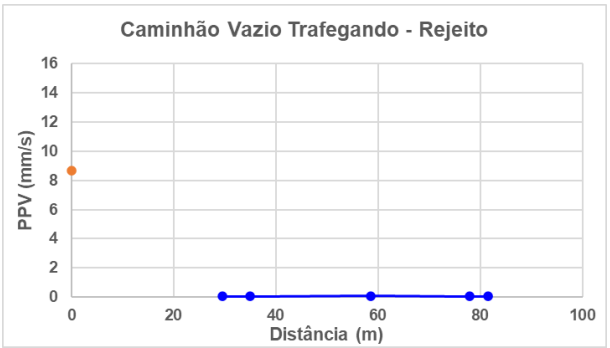


Figura 17. Curva de Atenuação – Caminhão – Trafegando

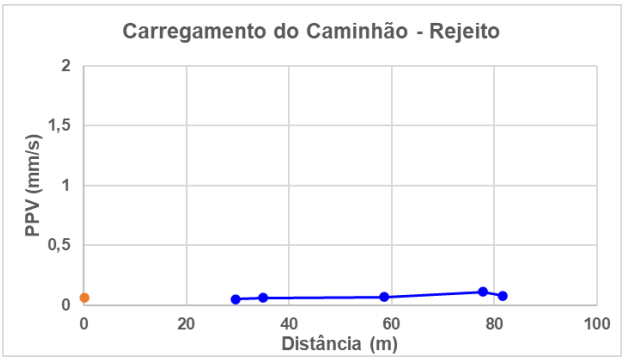


Figura 18. Curva de Atenuação – Carregamento do Caminhão

As curvas de atenuação da velocidade de partícula obtidas para o rejeito demonstram comportamento típico de dissipação de energia, com redução progressiva dos níveis de vibração à medida que se aumenta o afastamento em relação à fonte vibratória localizada na pista de ensaio.
Com base na avaliação das curvas de atenuação, foram destacadas aquelas associadas aos maiores níveis de vibração, correspondentes aos cenários operacionais considerados críticos. Conforme ilustrado na Figura 19, observa-se que, a aproximadamente 30 m da fonte vibratória, o PPV é da ordem de 0,5 mm/s, evidenciando atenuação expressiva em relação ao valor registrado no geofone central à pista, da ordem de 14 mm/s.

A análise comparativa entre os diferentes cenários indica que, embora a atuação simultânea dos equipamentos resulte em incrementos pontuais nos níveis de vibração, o comportamento de atenuação no rejeito mantém-se consistente. Assim, para os cenários analisados, recomenda-se um limite operacional mínimo de 30 m, valor definido de forma conservadora em função da ausência de registros em distâncias menores, uma vez que o

sismógrafo mais próximo se encontra instalado a cerca de 30 m da pista, imediatamente acima do dique de partida.

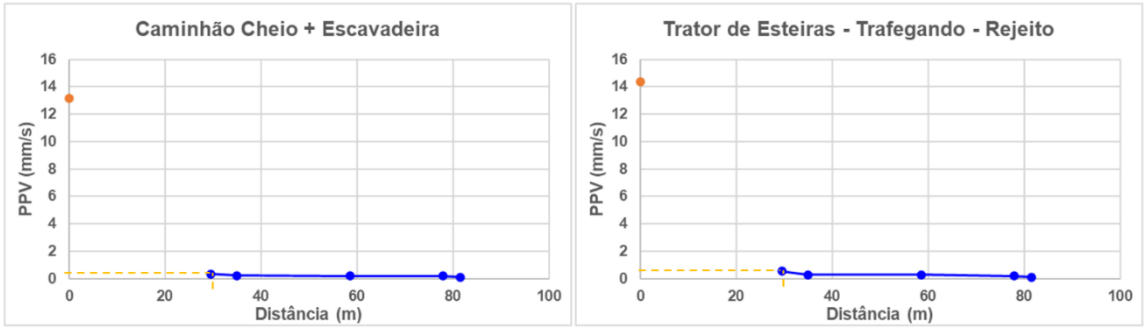


Figura 19. Curva de Atenuação – Equipamentos Críticos – Rejeito

A análise dos registros de poropressão obtidos a partir dos piezômetros instalados no rejeito indicou comportamento estável ao longo da execução dos testes. As séries temporais apresentaram pequenas variações, sem correlação direta com os eventos vibratórios induzidos, permanecendo dentro da faixa de flutuação natural do sistema. Não foram observados incrementos progressivos ou respostas abruptas que pudessem ser associados à propagação das vibrações provenientes da operação dos equipamentos.

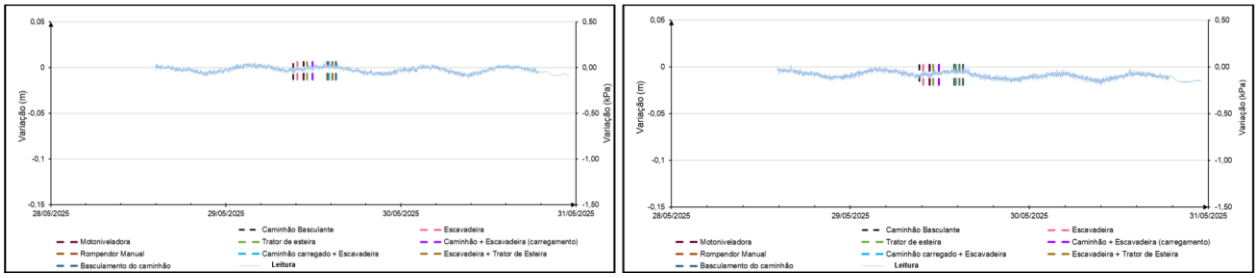


Figura 20. Piezômetros Existentes e Permanentes Próximos à Pista Teste

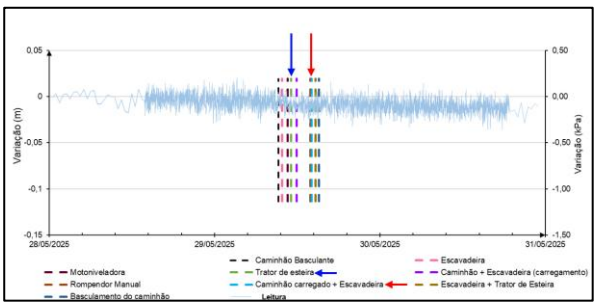


Figura 21. Piezômetro Existente e Permanente Distantes à Pista Teste

A avaliação integrada entre os registros de vibração e poropressão no rejeito indica que os níveis de vibração propagados durante os ensaios não foram suficientes para mobilizar respostas hidromecânicas adversas no maciço, considerando as condições analisadas.

6. RESULTADOS

Os resultados dos testes de vibração indicaram comportamento de atenuação semelhante da velocidade de partícula (PPV) na fundação e no maciço de rejeito, com redução progressiva dos níveis de vibração à medida que se aumenta o afastamento em relação à fonte vibratória localizada na pista de ensaio. Ressalta-se que, enquanto a fundação foi diretamente solicitada pela operação dos equipamentos, a resposta do maciço de rejeito reflete exclusivamente a propagação das vibrações geradas.

Em algumas simulações específicas, associadas a determinadas combinações operacionais e menores distâncias em relação às fontes vibratórias, foram registrados valores elevados de PPV, atingindo ou se aproximando dos limites definidos nas TARPs de monitoramento. Esses resultados evidenciam a sensibilidade do sistema à proximidade entre equipamentos e frentes de trabalho, especialmente em cenários de operação simultânea.

A partir da análise das curvas de atenuação, foi possível estabelecer distanciamentos mínimos seguros capazes de manter os níveis de vibração abaixo dos limites de atenção e alerta das TARPs, mitigando o risco de acionamento desses critérios durante a execução das obras.

Os registros de poropressão, obtidos a partir dos piezômetros instalados na fundação e no rejeito, não indicaram geração expressiva de poropressão associada aos eventos vibratórios. As variações observadas permaneceram dentro da faixa de flutuação natural do sistema, sem correlação direta com as passagens dos equipamentos, inclusive nos cenários envolvendo operações combinadas.

Os resultados obtidos permitiram a definição de limites máximos admissíveis de vibração e de distanciamentos mínimos seguros entre equipamentos e frentes de trabalho, fornecendo subsídios técnicos para o controle de vibrações e o planejamento da construtibilidade durante a execução das obras.

7. CONCLUSÕES

Os testes de vibração permitiram avaliar, de forma controlada, a resposta dinâmica da fundação e do rejeito frente à operação de equipamentos típicos de obras de reforço. A excitação dinâmica ocorreu diretamente sobre os materiais de fundação, enquanto a resposta do maciço de rejeito foi avaliada por meio do monitoramento da propagação das vibrações geradas.

A metodologia aplicada mostrou-se eficaz para a definição de limites operacionais seguros e de distanciamentos mínimos entre equipamentos e frentes de trabalho, contribuindo para o controle de vibrações, o planejamento da construtibilidade e a mitigação de riscos durante a fase construtiva. A análise das curvas de atenuação permitiu estabelecer critérios conservadores, especialmente nos cenários envolvendo a operação simultânea de equipamentos.

A comparação entre os níveis de vibração medidos e os limites estabelecidos nas TARPs de monitoramento evidenciou a adequação dos critérios operacionais adotados para a obra, permitindo validar os parâmetros definidos a partir dos testes como ferramenta de controle preventivo. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos consistentes para o gerenciamento das vibrações durante a execução das obras de reforço, contribuindo para a segurança operacional e geotécnica da estrutura avaliada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os profissionais que contribuíram para a viabilização dos testes experimentais, destacando a parceria estabelecida entre a Vale e a BVP Engenharia. O trabalho conjunto das equipes envolvidas foi essencial para a execução das atividades e para a qualidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albino, J. L.; Souza, T. A. T.; Machado, L. S. Evaluation of the geotechnical behavior of mining tailings through CPTU tests in the soil improvement process for the decharacterization of upstream heightened dams. *Cone Penetration Testing 2022*. Taylor & Francis, 2022.

Sousa, G. M., Ferreira, S. A., & Gomes, R. C. (2022). *Methodology for Automated Monitoring of Induced Vibrations in Tailings Dams Built Upstream*. Ouro Preto, MG, Brazil.